

特殊土加固理论与实践系列

湖北省学术著作出版基金资助项目

国家自然科学基金资助研究项目(编号: 40972185, 41202199, 41272308)

高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(编号: 200804910504, 20120145110014)

膨胀土工程特性及 改性理论研究

*PENGZHANGTU GONGCHENG TEXING
JI GAIXING LILUN YANJIU*

刘清秉 项伟 著
吴云刚 张伟锋



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

特殊土加固理论与实践系列

湖北省学术著作出版基金资助项目

国家自然科学基金资助研究项目(编号:40972185,41202199,41272308)

高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(编号:200804910504,20120145110014)

膨胀土工程特性及改性理论研究

刘清秉 项 伟 吴云刚 张伟锋 著



中国地质大学出版社

ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

图书在版编目(CIP)数据

膨胀土工程特性及改性理论研究/刘清秉等著. —武汉:中国地质大学出版社,2015.12
ISBN 978-7-5625-3324-5

- I. ①膨…
- II. ①刘…
- III. ①膨胀土-基础(工程)-研究
- IV. ①TU475

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 303595 号

膨胀土工程特性及改性理论研究		刘清秉 项 伟 吴云刚 张伟锋 著	
责任编辑:陈 琪		责任校对:张咏梅	
出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)		邮政编码:430074	
电 话:(027)67883511	传真:67883580	E-mail:cbb@cug.edu.cn	
经 销:全国新华书店		http://www.cugp.cug.edu.cn	
开本:787 毫米×1092 毫米 1/16		字数:333 千字	印张:13
版次:2015 年 12 月第 1 版		印次:2015 年 12 月第 1 次印刷	
印刷:武汉市籍缘印刷厂		印数:1—1 000 册	
ISBN 978-7-5625-3324-5		定价:45.00 元	

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

序

膨胀土在世界范围内广泛分布,遍布六大洲共计 40 多个国家。在我国,20 多个省份共计约有 3 亿人口生活在膨胀土分布地区。膨胀土问题已成为一项世界性难题,由于膨胀土不良特性导致的工程问题或地质灾害频繁发生,造成了国民经济的巨大损失。

与一般黏性土不同,膨胀土在一定的地质环境和条件下所形成的特殊矿物组分、结构特征,使其在受外界环境变化影响下具有力学软化、胀缩变形的特征,从而决定了其对上覆和邻近结构物的破坏影响往往具有多次反复性和长期潜在性等特点。具体来说,膨胀土的工程特性在于其强烈的胀缩势,而达到胀缩变形需要两个基本条件,即产生胀缩的物质基础和水分在土体及外界之间迁移的变化。前者包括含有亲水性的黏土矿物组分、含量和结构连接特点;后者主要与膨胀土区域的环境气候条件紧密相关,包括降雨、温度及蒸发作用等。特别在干旱及半干旱地区,膨胀土将发生膨胀—收缩—再膨胀的反复体积变化,这种频繁的胀缩变形,促使土体在原生裂隙的基础上,次生裂隙进一步加剧发展,从而为水分的渗入和水汽的蒸发提供了更好的通道,促使了土体中水介质的波动和胀缩变化的进一步发生。随着裂隙的深入扩展,土体整体结构性和连接性变差,强度急剧衰减,常发生松散崩解和垮塌,从而导致土体内原有的部分胶结连接作用力丧失,膨胀抑制力持续衰弱,膨胀势在更大程度上得以发挥。

自 20 世纪 60 年代末以来,广大岩土及地质工作者对于膨胀土的研究投入了极大的热情,并取得了一系列卓有成果。然而,由于膨胀土这一地质体自身的特殊性、复杂性,使其理论研究和治理实践仍存在诸多难点。比如,膨胀土一般处于非饱和状态,但又不同于非饱和砂土及粉土,其包含了大量的亲水活性的黏粒成分,无疑增加了非饱和状态下固—液—气等相态相互作用研究的难度,如何在目前的非饱和土力学理论框架下分析膨胀土受力变形特征并构建合理的本构关系,存在着诸多不确定性;膨胀土与水的相互作用机制则更为复杂,膨胀土水合能力及水合含量的变化是膨胀性黏土矿物与水接触过程中一系列物理化学作

用的结果,受黏土矿物表面物化性参数控制;同时随着水合状态的改变,黏土矿物颗粒水合能及颗粒之间的物化能不断调整,并以结合水“楔力”形式释放,促使颗粒间距增加,导致土体膨胀,因此,土体膨胀本质上是黏土矿物与水相互作用产生的物理—化学—力学效应的综合结果,而关于膨胀土的膨胀机理,目前尚无统一论;在膨胀土改性治理方面,目前仍广泛沿用水泥及石灰等一般土体加固材料,对于膨胀土这一特殊土,传统加固材料的改良效果及工程适宜性,仍存在很多疑问。因此,深入开展膨胀土的工程特性及改性理论的研究,具有重大的学术价值和迫切的工程实际意义。

本书的内容是笔者及课题组多年来针对南水北调中线工程沿线膨胀土工程特性及物化改性方面进行的系统科研工作的总结。其间,得到了国家自然科学基金、高等学校博士学科点专项科研基金、河南水利科技攻关基金的资助。笔者及课题组通过在南水北调中线工程沿线膨胀土地区长期深入实际的工作,获取了丰富的第一手资料,并对沿线膨胀土开展了大量现场及室内试验研究,提出了水利工程中膨胀土胀缩变形预测计算方法及理论模型,并从黏土矿物—水相互作用的微观角度提出了离子土固化剂改性膨胀土的新型方法。

本书主要内容分两部分:第一部分系统论述了南水北调中线工程沿线区域内膨胀土工程地质特性及胀缩变形特征,包括工程区膨胀土矿物的化学及结构特征,膨胀土膨胀潜势分类区划及膨胀机理分析,膨胀土浸水膨胀变形特征规律, K_0 及三轴应力条件下膨胀本构模型研究等。第二部分重点介绍了采用本课题组研发的新型离子土固化剂改性膨胀土的理论研究成果,包括离子土固化剂改性膨胀土胀缩能力试验研究,改性膨胀土力学性质及长期稳定性,改性膨胀土地基承载力离心模型试验,固化剂对膨胀土表面理化性质、微结构及矿物组分的作用机制,膨胀土表面水合机制、水合模型及离子土固化剂改性机理研究等。

本书共8章,其中第1章、第4章、第6章、第7章由刘清秉撰写,第2章由张伟锋、吴云刚撰写,第3章、第5章由刘清秉、吴云刚撰写,第8章由项伟撰写。楼蓉蓉、崔德山也参与了部分工作。全书由刘清秉、项伟统稿。

在本书撰写过程中,中国科学院武汉岩土力学研究所汪稔教授及其学术团队对部分数据的收集和整理提供了帮助,西澳大学 Barry Lehane 教授、维也纳农业大学吴伟教授及其学术团队、科罗拉州矿业大学卢宁教授等也给予了宝贵的意见,在此一并表示衷心的感谢!在本书完成之际,笔者对河南省水利科学研究院、

长江科学院、中国科学院武汉岩土力学研究所及澳大利亚西澳大学等单位对本项目的研究所提供的支持和帮助表示衷心的感谢!

同时也感谢为本项目研究付出努力的历届研究生,他们是崔德山博士、卢雪松博士、王顺博士、林志红硕士、董晓娟硕士、楼蓉蓉硕士、张茜硕士、夏东生硕士、王青薇硕士等。他们参与了本项研究的大量野外调查、资料收集、数据处理和分析工作。

如前所述,膨胀土研究是一项难度很大的复杂课题,许多问题目前尚无统一的认识。本书所阐述的内容和表达的观点仅仅是笔者近些年来对膨胀土问题研究的体会,但由于笔者水平有限,书中难免存在错漏和不足之处,恳请读者批评指正。

笔 者

2013 年 12 月于中国武汉

目 录

1 绪 论	(1)
1.1 膨胀土的概念与定义	(1)
1.2 膨胀土对工程建设的危害	(1)
1.2.1 膨胀土的分布及其地质成因	(1)
1.2.2 工程建设中的膨胀土问题	(3)
1.3 膨胀土研究的进展	(4)
1.3.1 膨胀土工程性质及膨胀机理研究	(4)
1.3.2 膨胀土本构模型研究	(9)
1.3.3 膨胀土加固改良技术研究	(13)
1.4 膨胀土研究的展望	(18)
2 膨胀土物化性质及结构	(19)
2.1 膨胀土的颗粒组成	(19)
2.2 膨胀土矿物成分	(22)
2.3 膨胀土物化性质	(25)
2.3.1 膨胀土化学成分	(25)
2.3.2 膨胀土阳离子交换量及可交换阳离子	(26)
2.3.3 膨胀土中可溶盐及胶结物	(28)
2.4 膨胀土结构特征	(30)
2.4.1 膨胀土宏观结构	(30)
2.4.2 膨胀土微观结构	(33)
3 膨胀土判别分类及膨胀机理	(38)
3.1 概 述	(38)
3.2 判别分类原则及关键性指标选择	(38)
3.3 水汽吸附指标判别分类方法	(40)
3.3.1 试验土样和方法	(41)
3.3.2 试验结果与分析	(42)

3.4	膨胀土胀缩机理	(45)
3.4.1	影响膨胀土胀缩的因素	(45)
3.4.2	膨胀土胀缩机理理论	(46)
4	膨胀土胀缩变形特征	(49)
4.1	概述	(49)
4.2	膨胀土浸水膨胀时程特征和膨胀速率	(51)
4.2.1	原状样和重塑样膨胀时程曲线	(51)
4.2.2	膨胀变形时程阶段特征	(53)
4.2.3	膨胀速率参数定义及应用	(55)
4.3	土样初始状态对膨胀变形特征的影响	(57)
4.3.1	膨胀率随土样初始孔隙比的变化	(57)
4.3.2	初始饱和度对于膨胀率的影响	(60)
4.3.3	膨胀率随上覆压力的变化关系	(62)
4.3.4	膨胀体积中“孔隙水-气”分量变化规律	(65)
4.4	膨胀土循环胀缩变形特征规律	(67)
4.4.1	胀缩变形量随循环级数、初始状态的变化规律	(68)
4.4.2	胀缩循环中“含水量-孔隙体积”的变化路径	(70)
5	膨胀土膨胀本构模型	(73)
5.1	K_0 膨胀本构模型建立	(73)
5.1.1	膨胀土有荷膨胀本构关系及验证	(73)
5.1.2	K_0 膨胀本构模型一般表达式及参数取值探讨	(83)
5.1.3	K_0 膨胀本构模型的应用探讨	(85)
5.2	膨胀土三轴膨胀本构模型	(91)
5.2.1	试验介绍	(91)
5.2.2	南阳中膨胀土三轴膨胀本构经验模型建立	(93)
5.3	K_0 膨胀与三轴膨胀相关性分析	(96)
5.3.1	反分析南阳中膨胀土平均侧压力系数	(96)
5.3.2	反演的平均静止侧压力系数规律性分析	(99)
5.4	膨胀土本构模型公式应用计算程序实现	(103)
5.4.1	软件简介	(103)
5.4.2	计算模块简介	(103)

6 离子固化剂改性膨胀土性质研究 (108)

6.1 离子固化剂成分 (108)

6.2 离子固化剂改性膨胀土胀缩能力试验研究 (109)

6.2.1 改性土自由膨胀率及最优配比浓度确定 (109)

6.2.2 膨胀变形能力对比分析 (113)

6.2.3 膨胀力变化规律 (119)

6.2.4 收缩特征曲线及胀缩各向异性比较 (122)

6.3 ISS 改性膨胀土承载力离心模型实验 (127)

6.3.1 离心模型原理和试验仪器 (127)

6.3.2 离心模型静力触探试验 (129)

6.3.3 球孔扩张理论分析改性前后锥尖阻力变化机制 (132)

6.4 ISS 改性膨胀土耐候性 (138)

6.4.1 单轴无侧限抗压强度试验 (139)

6.4.2 破坏强度与冷端温度的关系 (140)

6.4.3 未改性土与 ISS 改性土的强度对比 (142)

7 离子土固化剂改性膨胀土物化机理分析 (145)

7.1 阳离子交换量及可交换阳离子定量分析 (145)

7.1.1 概 述 (145)

7.1.2 试样制备和试验方法 (146)

7.1.3 阳离子交换量及可交换阳离子变化 (146)

7.2 膨胀土胶粒电动性质 (149)

7.2.1 土胶粒表面扩散双电层 (149)

7.2.2 电泳试验土胶粒制备和试验方法 (150)

7.2.3 电位值变化结果分析 (151)

7.3 比表面积及孔隙结构分析 (152)

7.3.1 比表面积 (153)

7.3.2 孔隙体积量及孔径分布特征 (155)

7.4 膨胀土微结构特征及能谱分析 (158)

7.4.1 试验样品制备和方法 (159)

7.4.2 改性前后膨胀土微结构特征比较 (159)

7.4.3 能谱测试分析 (162)

7.5	ISS 改性膨胀土矿物成分及晶层间距分析	(162)
7.5.1	粉晶样 XRD 图比较	(163)
7.5.2	黏土矿物组衍射图比较	(164)
7.5.3	乙二醇及水汽饱和黏粒定向片分析	(165)
8	膨胀土水合机制及改性土水合模型	(168)
8.1	膨胀土结合水形式及土-水作用性质	(168)
8.1.1	膨胀土中黏土矿物的水化活性形式	(168)
8.1.2	结合水含量对黏土胀缩机制的影响	(169)
8.2	膨胀土表面吸附结合水类型界定及量化分析	(170)
8.2.1	膨胀土表面等温水汽吸附特征	(171)
8.2.2	结合水热失重-差热分析	(173)
8.3	ISS 改性膨胀土表面结合水定量分析	(177)
8.3.1	改性土表面结合水分布、数量	(177)
8.3.2	改性土吸附结合水红外光谱分析	(179)
8.3.3	液态水化下 ISS 对土表面结合水的改变	(183)
8.4	ISS 与膨胀土结合水作用模型及改性机理分析	(185)
	参考文献	(189)

1 绪 论

1.1 膨胀土的概念与定义

膨胀土是现代工程地质学和土力学中新近出现的一个名词,它是有别于黄土、红土、软土、冻土及普通黏土的一类特殊性黏土。由于在形貌上和工程性质上的特殊性,以及对于工程建筑产生的严重破坏作用,膨胀土引起了人们的重视,是一种典型的“灾害土”。

关于膨胀土的概念,劳动人民在长期的生产实践过程中有着极其丰富的认识。若干年来,民间一直有着许多对于膨胀土的形象描述及称呼。例如,陕南一带将其称作“黄胶泥”,反映了当地黄色膨胀土吸水软化后的胶黏性;湖北地区叫它“蒜瓣土”,是对膨胀土多裂隙结构的生动描述;“狗子油”的叫法更是对膨胀土裂隙面上的次生黏土及其光滑结构面特性的深刻揭示;而南方广为流传的“晴天一把刀,雨天一团糟”和“天晴张大嘴,雨后吐黄水”,则可以说是对膨胀土强度特性和胀缩特性的高度概括。

在专业领域,广义的“膨胀土”研究对象主要包括新近纪、第四纪以来各种成因类型的膨胀性黏土,以及第四纪以前各种膨胀岩形成的风化产物。基本上,这一种特殊型黏土虽然在世界大陆分布上有明显的地带特征,但表现的独特膨胀土地貌景观及工程地质特性是一致的。已有的研究成果多将膨胀土作如下定义:主要由强亲水性黏土矿物(蒙脱石、伊利石、高岭石等)组成,具有明显膨胀结构、多裂隙性、强胀缩特性和强度衰减性的高塑性黏性土。其具有如下典型的工程特性:①是一种高塑性黏土,这种高塑性主要由土中高黏粒含量所决定,典型的膨胀土中粒径小于 $2\mu\text{m}$ 的粒组含量一般超过30%;②黏土矿物中以具有膨胀晶格的蒙脱石及部分混层矿物为主;③土体随外界水分迁移变化发生明显的胀缩变形,并伴随着以膨胀力释放扩张形式对上覆及邻近结构物发生应力作用;④对气候环境及水文因素非常敏感,因反复循环性的胀缩变形导致土体外在形态上常见明显的多裂隙性及各级裂隙组合;⑤强度衰减性;⑥超固结性。

1.2 膨胀土对工程建设的危害

1.2.1 膨胀土的分布及其地质成因

膨胀土在世界范围内广泛分布,遍布六大洲共计40多个国家。我国是膨胀土分布最广泛的国家之一,自20世纪50年代以来,我国先后发现的膨胀土危害地区已达20余省、市、自治区,遍及西南、中南、华东、华北、西北以及东北的一部分,广泛分布在从黄海之滨到川西平原、从雷州半岛到华北平原的狭长地带。根据各地资料和国内历次有关膨胀土会议的文件记载,

我国已开展膨胀土研究工作的地区主要有云南、贵州、四川、陕西、广西、广东、湖北、河南、安徽、江苏、山东、山西、河北等省区,此外,吉林、黑龙江、新疆、湖南、江西、北京、辽宁、甘肃及宁夏等地近年来也陆续发现有膨胀土分布。我国膨胀土主要分布在从西南云贵高原到华北平原之间各流域形成的平原、盆地、河谷阶地,以及河间地块和丘陵地带,其中,尤以珠江流域的东江、桂江、郁江和南盘江水系,长江流域的长江、汉水、嘉陵江、岷江、乌江水系、淮河流域、黄河流域以及海河流域各干流水系等地区,膨胀土分布最为集中。

我国特定的区域地质背景,以及所处自然地理位置和气候条件等客观因素,不仅决定了膨胀土分布地域的广泛性,而且还决定了膨胀土成因类型的多样性,其内容是极为丰富的。

在我国云南,膨胀土主要分布在滇西南高原下关、保山一线以东、蒙自-大屯盆地和鸡街盆地,以及文山、开远、玉溪、滇东北的山涧盆地,宾川、曲靖、茨营、昭通等地。这些盆地在近新纪形成时期,大多同时沉积了泥岩、泥灰岩和黏土岩一类地层,而后经风化、淋滤,一部分残留于盆地或缓丘形成残积膨胀土,另一部分则被水流搬运而形成冲积-湖积膨胀土。贵州膨胀土分布在黔东南、黔西北以及黔中的小型山涧盆地和丘陵缓坡,如贵阳、都匀、安顺、遵义等地,主要是在岩溶地貌上由碳酸盐岩风化残积生成的红色黏土。四川的川西平原,川中丘陵,涪江、岷江、嘉陵江以及安宁河等河谷阶地普遍分布的膨胀土,主要是红色的黏土岩、泥灰岩风化经流水和冰水搬运堆积形成的。其中,著名的成都黏土过去一直被认为是冰水沉积的典型,但近来有学者提出它属于冲积和风积成因的观点。另外,在部分山麓地带还分布有部分冲积-洪积与残积-坡积成因的膨胀土。陕西膨胀土集中于陕南,沿汉水河谷的汉中盆地、安康盆地等河湖盆地与阶地呈带状分布,主要是各类火成岩和变质岩系风化破碎、极度分解,经水流搬运由冲积与洪积形成。广西膨胀土分布十分广泛,其中,宁明、平果、百色一带的膨胀土主要是由近新纪湖相沉积黏土岩、泥灰岩的风化物残积形成。其次也有部分风化物质经流水搬运由冲积形成。南宁膨胀土由冲积、洪积形成,而桂中的桂林、柳州、来宾以及贵县等岩溶盆地或丘陵分布的膨胀土,则是由碳酸盐岩风化残积成因形成的红色黏土。广东的广州、东莞一带膨胀土主要是凝灰岩风化的产物,而琼雷台地中琼北分布的膨胀土则是第四纪玄武岩风化残积的产物。湖北江汉平原、鄂东北与鄂西低山丘陵及山涧盆地,如襄樊盆地、光化、荆门、宜昌等地都广泛分布有膨胀土,主要是泥灰岩、各类变质岩与火成岩风化的产物,一部分经水流搬运由湖积、冲积或洪积形成,一部分在原地残积形成。河南膨胀土主要分布在豫中和豫西的南阳盆地,平顶山膨胀土主要在第四纪湖相沉积形成,南阳膨胀土则是泥灰岩以及部分变质岩系风化的产物,在水流的搬运下,沉积形成一套灰绿、灰白色湖相黏土,以及以冲积相为主的红、黄等色膨胀土。安徽境内膨胀土主要分布在江淮丘陵的河谷平原、南淝河阶地与洪积扇,如合肥、马鞍山和淮南盆地等,基本上是由红色黏土岩风化经水流搬运形成的冲积、洪积膨胀土。山东的鲁中南低山丘陵各山间盆地与山麓地带,泰安、莱芜、新太、新纹、宁阳以及临沂、沂水、平邑等地均广泛分布有膨胀土,大多是火成岩系、碳酸岩和泥灰岩的产物,由水流搬运形成的冲积、湖积与冲积、洪积物,部分为残坡积成因。山西沿晋中盆地的太谷盆地和沁水盆地一带,如太谷、榆社、武乡、霍县、沁县、长治分布的灰绿、棕红、褐、紫等杂色膨胀土,主要是泥灰岩、砂页岩风化的产物,经水流搬运在盆地富集,又经湖相沉积与河流相冲积形成。河北膨胀土主要分布在太行山麓平原边缘的邢台、邯郸一带,为玄武岩、泥灰岩的风化产物经冰水搬运形成的湖相沉积物。

现将我国各地典型膨胀土的成因类型以及生成的母岩或物质来源汇总表如下(表 1-1)。

表 1-1 我国部分地区膨胀土主要成因类型

地区		膨胀土成因类型	母岩或物质来源
云南	鸡街	冲积、湖积	新近纪泥岩、泥灰岩
	曲靖	残坡积、湖积	新近纪泥岩、泥灰岩
贵州	贵阳	残坡积	石灰岩风化物
四川	成都	冲积、洪积、冰水沉积	黏土岩、泥灰岩风化物
	南充		
	西昌	残积	黏土岩
广西	南宁	冲积、洪积	泥灰岩、黏土岩风化物
	宁明	残坡积	泥岩、泥灰岩风化物
	贵县	残坡积	石灰岩风化物
广东	琼北	残坡积	第四纪玄武岩风化物
陕西	安康	冲积、洪积	各类变质岩和火成岩风化物
	汉中		
湖北	襄樊	冲洪积、湖积	变质岩、火成岩风化物
	荆门	残坡积	黏土岩风化物
河南	南阳	冲积、洪积	
	平顶山	湖积	玄武岩、泥灰岩风化物
安徽	合肥	冲积、洪积	黏土岩、页岩、玄武岩风化物
	淮南	黏土岩风化物	黏土岩风化物
山东	临沂	冲积、湖积、冲洪积	玄武岩、凝灰岩、碳酸盐风化物
	泰安	冲积、湖积、冲洪积	泥灰岩、玄武岩、泥岩风化物
山西	太谷	湖积、冲积	泥灰岩、砂页岩风化物
河北	邯郸	湖积	玄武岩、泥灰岩风化物

1.2.2 工程建设中的膨胀土问题

大量工程实践表明,在膨胀土中修建的各种工程建筑所经受的变形破坏往往是不同于其他岩土。膨胀土给工程建筑带来的危害,既表现在地表建筑物上,又反映在地下工程中。不仅包括铁路、公路、渠道的所有边坡、路面和基床,也包括房屋基础、地坪,同时包括地下洞室及隧道围岩、衬砌,甚至还包括这些工程中所采取的稳定性措施,如护坡、挡土墙和桩等。以至于从某种意义上讲,膨胀土对于工程建筑的危害是无所不在的。例如,房屋建筑中,我国广西、湖北、河南均发生了大面积住房变形破坏,有些轻型建筑物,即使打桩穿越了膨胀土层并加固了基脚,但纵向、横向仍发生了较大的变形位移,导致桩被剪断,而强大的膨胀压力使得房屋发生拱起、开裂。路基工程中,干膨胀土块坚硬,难击碎压实,湿土则塑性大,呈橡皮泥状,难以满足填料要求,长期开挖后堆积,不仅破坏地形地貌,且易随雨水流失,以致冲毁耕田,威胁道路安全。此外,膨胀土路基碾压加固后,也往往产生局部坍塌和隆起。从路堑边坡来看,大气物理风化作用以及湿胀干缩效应,常使边坡土块崩落,抗剪强度衰减,边坡溜塌、滑坡等病害非常突出。我国每年因膨胀土造成的各类工程损失达数亿元以上。在水利工程中,我国南水北调中线总干渠分布有膨胀土的渠段长 279.7km,因分布距离长、处理技术难度高、制约因素多,膨

胀土问题严重影响工程的建设和输水的安全性。

同时,膨胀土对建筑物的破坏往往具有多次反复性和长期潜在危险性的特点,采用多种工程措施后,常使工程造价显著提高。所以,国外工程人员中有人将膨胀土比喻为“昂贵土”(expensive soil)。世界各国对于膨胀土的认识,也大都首先经历了工程建筑的深受其害,然后在设法解决这一问题的实践中才逐步领悟和加深了解的,即经历了反复的实践和认知的过程。

1.3 膨胀土研究的进展

1.3.1 膨胀土工程性质及膨胀机理研究

20 世纪 60 年代以来,由于膨胀土地区频繁的工程事故,引起了广大岩土工作者的高度关注。国际上先后召开了 7 届膨胀土专项议题的工程大会以及与膨胀土紧密相关的非饱和土会议。世界上很多国家先后制定了针对膨胀土地区工程建设的规范和标准。我国于 1987 年制定了《膨胀土地区建筑技术规定》。迄今为止,科研人员就膨胀土矿物组分、宏微观结构、胀缩变形特性以及物理力学性质开展了一系列卓有价值的研究,现将国内外关于膨胀土相关研究现状进行概述。

1) 膨胀土矿物组分及宏微观结构

膨胀土的矿物主要分成两大类,即黏土矿物和非黏土矿物。其中,非黏土矿物主要为碎屑类矿物,如长石、石英及云母等,另外,部分膨胀土粗粒组分里含有易遇水结晶且体积扩张的石膏。一般来说,对膨胀土诸多不良工程性质起决定作用的主要为三大黏土矿物,即蒙脱石、伊利石及高岭石。因此,对于这 3 种黏土矿物的研究一直是膨胀土矿物组分及化学性质研究的焦点。关于膨胀土黏土矿物的定性及定量分析测试手段,目前主要有 X 射线衍射(XRD)、差热分析、红外光谱及扫描电镜,等等。这些测试方法的原理为:不同黏土矿物由于结晶方式及原子排列的差异而表现出的不同晶体结构特征,以及对光谱和热反应的不同响应。尽管如此,由于黏土矿物自身成分结构的复杂性,特别是各种混层矿物的存在,要精确量化膨胀土中各黏土矿物成分的含量,仍是一项难题。

邵国敏等(1994)采用 XRD 和次甲基蓝-氯化亚锡方法对我国 10 多个省份代表性膨胀土样中的蒙脱石及蒙脱石-伊利石混层矿物进行定量分析,并对黏土矿物的成分含量与膨胀土的膨胀潜势分级作相关性研究。廖世文(1984)研究表明,当膨胀土中蒙脱石含量达到 5% 时,即可对土体的强度和胀缩变形产生显著的影响。燕守勋等(2005)通过傅里叶红外光谱法对 55 个表层和潜表层的膨胀土干燥粉末样进行测试,分析出红外光谱指标与膨胀土中蒙脱石矿物含量、胶粒、黏粒成分的相关性,并指出可借助 2 200nm、1 900nm、1 400nm 红外吸收光谱吸收特征来区分高、中、低各级膨胀土。姚海林等(2004)提出用标准吸湿含水率对膨胀土进行分类,并从蒙脱石矿物晶层吸附水分子厚度对标准吸湿含水量的含义进行理论验证。Schmitz(2004)以 3 种不同的膨胀性黏土以及蒙脱石和伊利石两种标准参考矿物为研究对象,分析认为,对含有多种黏土矿物的天然膨胀性黏土,可以采用等效矿物层间距指标(EBS)来预测 Atterberg 界限含水量及膨胀土的其他相关工程性质。

由于蒙脱石为 2:1 型单元晶胞叠合形式,相邻层间联结力弱,水分子易挤入层间,且内、外比表面积大,使之成为三大黏土矿物中最活跃矿物,并一直是膨胀土黏土矿物研究的焦点。

Slade(1991)选取两种表面电荷密度相似的蒙脱石,研究晶层电荷的分布位置对于其层间膨胀的影响,当电荷位于蒙脱石晶胞的硅氧四面体中时,膨胀性明显要弱于电荷位于硅-铝氧八面体片的情形。因为八面体片对于阳离子电荷的吸附力要小得多,不能阻止多数阳离子的水合膨胀过程。Salles(2007)测量了5种碱金属离子的水合能大小,并且分析不同碱金属离子对于蒙脱石表面水合能的影响作用,结果表明,对于层间吸附阳离子为 Li^+ 、 Na^+ 的蒙脱石,层间离子的水合膨胀是主导因素,而对于 K^+ 、 Rb^+ 等弱水合能离子,水合作用主要发生在晶层表面和侧面。Zhang(1995)采用XRD确定蒙脱石层间距,并利用氮气加压对钠蒙脱石晶层间膨胀力进行测量,发现当 d_{001} 间距大于2nm时,该方法测定的膨胀力值达到几百千帕。这里假定了层间膨胀力等同于氮气外加压力,并且认为此时的膨胀已经超过了晶层膨胀的阶段而进入连续的长程膨胀。Kominé(1996)提出了关于膨润土膨胀力与蒙脱石层间结构和表面理化性质的量化关系式,该关系式分析了蒙脱石晶层间距、孔隙水溶液离子浓度、比表面积各因素值对于膨胀力大小的贡献,通过分析晶层间各种排斥和吸引作用力耦合作用关系对量化关系公式进行理论解释。通过与试验实测结果进行对比,表明该理论公式具有良好的预测精确度。谭罗荣(2002)用不同浓度电解质溶液调制蒙脱石试样进行X射线衍射试验,发现蒙脱石晶体的 d_{001} 晶面间距在试样失水至极低含水量过程中存在着反向膨胀的现象,并认为这种反常膨胀与制样时所用电解质溶液浓度有关,而不是由于晶层间阳离子的代换造成的,也不是温度变化引起的。

通过对膨胀土各黏土矿物,特别是具有活跃膨胀晶格的蒙脱石族矿物的研究,可较好地从矿物学角度揭示膨胀土-水体系相互作用机制。除矿物成分外,土体宏观结构同样是制约膨胀土习性的关键因素。膨胀土的宏观结构主要表现为各种发育的裂隙和裂隙面组合。由于裂隙的存在为土体吸收水分提供了良好的结构性条件,进而导致土体整体力学变形性质的衰减。随着计算技术的发展及各种数学模型的建立,裂隙特征的研究经历了从定性到量化的发展过程。近些年随着CT技术在岩土工程中的应用,使得观测未受扰动膨胀土中原生裂隙分布成为可能。

徐永福(1998)、易顺民(1999)认为膨胀土表面裂隙分布具有较好的分形特征,且受含水状态的影响,多数土样分维数在2~3之间。袁俊平、殷宗泽(2004)采用远距光学显微镜观测膨胀土样,利用图像处理软件将数字图像转化为二值化位图,统计出裂隙部位在二值图像中暗色区域的分布面积,并采用图像学指标中的灰度熵概念量化表征裂隙程度。膨胀土裂隙程度和分布特征对于土体最直接的影响在于两个方面:渗流特性和力学强度。试验结果表明,通用的渗流立方定律无法在裂隙区内得到精确满足,由于裂隙分布的空间复杂性,多数研究只简化以平板型裂隙渗流为主。速宝玉等(1994)认为,裂隙中充填物质的颗粒和粒径极大地制约着裂隙的渗透性。李培勇等(2008)考虑了各种不同因素对于非饱和膨胀土的裂隙演化及发育程度的影响作用,结果表明,强度指标如有效黏聚力、内摩擦角、基质吸力等与土开裂程度密切相关,其中基质吸力存在一个临界状态值,超过此值才可能出现由于吸力而引起的表面裂隙。地下水位对于膨胀土的张拉裂隙影响存在极限值,该极限裂隙深度可以通过假设地下水位深度为无限大的情况计算得到。

膨胀土的宏观裂隙结构形态除受外在因素的作用而改变外,较大程度上由其自身微观结构形态的发育变化来控制。土体微观结构指在一定地质环境条件下,土颗粒、孔隙及胶结物组成的整体结构体系。膨胀土的一种基本微结构类型是黏土颗粒基质与无序排列的粉、细砂粒构成的基质状结构。其中,黏土颗粒形状多为片状和扁平状,颗粒间彼此互相聚集成微型聚集

体或叠聚体。由于蒙脱石、伊利石的层状晶体结构,黏土颗粒相互排列形式多呈定向性。

许多学者结合 X 射线能谱仪(EDX)、扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)等现代观测手段对膨胀土的微结构形态作出了较全面的研究。高国瑞(1981)研究了膨胀土中面-面叠聚体和边-面-角连接对于胀缩性的影响,认为平行的叠聚体吸水膨胀、失水收缩的形态犹如手风琴片;对于边-面-角连接,由于片上多富集负电荷,而角-边带正电荷,因为电荷的相互吸引,整体上易形成较稳定的架状网式结构,这种结构相对稳定,导致膨胀能力低于片叠聚体。施斌(1995,1997)、李生林等(1992)、谭罗荣等(1994)研究了我国多数省份典型膨胀土工程性质和微结构的相互关系,提出了 3 种微结构单元形式以及 6 种微结构连接特征。Katti(2006)研制了能随时控制单轴膨胀变形量并测定相应膨胀下膨胀力的仪器,并借助 SEM 及 X 射线能谱仪对土体在整个吸水膨胀过程中的微结构形态进行动态实时观测,结果表明随着膨胀变形不断增加,膨胀力逐渐增加,土颗粒尺寸显著减小,膨胀导致大的黏粒团聚体分解为更细、更小尺寸的团粒。

总结目前关于膨胀土微观结构的研究成果可知,如何将土体微结构特征进行参数量化表征,并将微结构参数包含到数学模型中以获得能够兼顾微结构因素的膨胀本构模型,是一个值得开展研究的方向。

2) 膨胀土胀缩特性及影响因素

膨胀土区别于一般黏性土最突出的特征在于其受外界环境影响时,土体中水分的迁移变化所呈现的体积膨胀和收缩现象。由于各类膨胀土地质成因、物质化学组分、结构特征、所处的外界环境条件(地下水、温湿度)、上覆压力等各因素差异,工程中常表现出不同的胀缩潜能及变形量。

表征土膨胀特性的指标主要有膨胀量和膨胀力两类。其中,膨胀量是指土体在吸水过程中体积膨胀变形量与初始体积的比值,根据上覆压力情况又分为有荷膨胀率和无荷膨胀率。膨胀力是指当土体吸水体积膨胀受到外界限制,而表现出试图冲破外界阻碍的内应力。另外,在膨胀土分级时,常直接取土颗粒在水中的自由膨胀率指标来评价膨胀潜能。

上述几项指标的测试,常在实验室内采用原状土或重塑土样进行,由于实验条件或制样方法的差异,对于同一种膨胀土,膨胀性指标的结果常表现出较大的离散性。如 Shahid Azam 测试 Al-Qatif 区膨胀黏土膨胀力发现,采用大尺寸的圆柱试样的膨胀力值只是常规固结仪小尺寸试样的 65%,此外,采用圆柱形试样和立方形试样测试的值也不一致。为克服室内试验的误差,现场的大比例尺膨胀特性试验技术的研究正亟待开展。

不同膨胀土的膨胀变形过程在以下几个方面表现出较大的差异:①膨胀变形随时间的变化特征,或称膨胀时程特征、膨胀速率特征;②膨胀各向异性,即土体膨胀变形在空间上的分布特征;③反复(循环)胀缩表现。

Roslan Hashim 等(2006)将膨胀分为 3 个阶段:孔隙水分填充、主膨胀和次级膨胀。其中,主膨胀和次级膨胀与黏土矿物晶层结构膨胀及黏土颗粒表面双电层厚度增加密切相关。刘特洪(1997)根据线膨胀率和吸水时间的变化关系,将膨胀速度划分 3 个阶段:等速、减速和缓慢膨胀阶段,并认为 3 个阶段的界限点主要受胶粒含量和矿物组分、结构的影响。黄熙龄等(1992)分别在改进的三轴仪和三向胀缩仪的基础上,分析了重塑膨胀土在水平和垂直方向上膨胀力及变形的差异性,并指出膨胀的各向异性很大程度上受土样初始状态,如干密度的影响。Elif Avsar(2009)采用贴有应变片的薄壁环代替常规的环刀,测试膨胀参数在水平和侧向

的分布,对于 Ankara 膨胀土,实测其水平膨胀力与垂直膨胀力的比值在 0.38~0.98 之间,通过 SEM 观测得到 Ankara 黏土矿物微结构单元主要为水平或近水平向的叠片聚体,且主要以面-面连接,表明了膨胀力在空间分布的各向异性受黏土矿物微结构特征作用。刘松玉等(1999)、杨和平等(2005)指出,膨胀土经历每一次湿胀干缩循环后,其变形量是不可恢复的,且随着循环次数的增加,每一次胀缩变形量的绝对值是不断减小的,但总体膨胀变形量不断增加,并最终趋于稳定平衡状态。

对于特定的某种膨胀土,其胀缩特性主要受以下几个因素控制:①黏土矿物,以蒙脱石含量为主的土胀缩性最大,伊利石次之,高岭石最小;②土样干密度和上覆压力,初始干密度越大,上覆压力越小,土体吸水膨胀量越大;③土水化介质溶液性质,离子浓度高、离子化合价最大的水溶液,对土体膨胀性有所抑制;④结构连接特征,如重塑作用因为对结构造成破坏扰动,将显著影响胀缩特性;⑤渗透系数、气候条件等。

3) 膨胀土力学强度特性

早期膨胀土研究过于侧重其胀缩变形特征,一定程度上忽视了对其强度变化规律的分析。随着大量的膨胀土边坡灾变的发生,越来越多的学者开始正视膨胀土强度特性和破坏机理的研究,并取得了一系列有价值的成果。

Bjerrum 和 Skempton 最早提出膨胀土边坡发生滑动破坏是一个强度逐渐衰减的过程,即土体抗剪强度首先在某一点或某一个微裂隙面所形成的应力集中区达到极限状态而破坏并逐渐展开,伴随发生各种变形错动面和宏观裂隙,最终土坡沿着某一贯通面发生整体滑落。Bishop(1959)提出膨胀土边坡在开挖初始阶段多为稳定的,但若干年后破坏才发生,并认为这种滞后破坏现象的主要原因是黏聚力衰减的时间效应和缓慢的孔隙水压力平衡消散过程。

自然界中,地下水以上浅膨胀土层受降雨和干旱等气候变化作用,绝大多数处于非饱和状态,将非饱和力学原理应用到膨胀土的力学强度特征的分析中有着重要的实际意义。和饱和土一样,有效应力方程一直是很多学者研究非饱和土力学的重点。Bishop、Fredlund、沈珠江先后基于不同假定给出了非饱和有效应力公式:

$$\text{Bishop: } \sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w) \quad (1-1)$$

$$\text{Fredlund: } \sigma' = \sigma - u_a + \int_{\theta}^{u_a} \left[\frac{\theta - \theta_r}{1 - \theta_r} \right]^p du_s \quad (1-2)$$

$$\text{沈珠江: } \sigma' = \sigma - u_a + \frac{u_s}{1 + du_s} \quad (1-3)$$

式中: u_a 、 u_w 分别为孔隙气压力和孔隙水压力; $u_s = u_a - u_w$ 为基质吸力; θ 、 θ_r 分别为体积含水量和残余含水量; χ 为饱和度参数; p 、 d 为常数参数。

Bishop 采用有效应力公式表征强度参数 τ ,采用的是单应力变量,即式(1-1)。Fredlund 提出双应力变量强度公式,即分别考虑外加应力 $\sigma - \sigma_a$ 和内部吸力 u_s 对剪切强度的贡献。沈珠江提出的吸力 u_s 有别于 Fredlund 的基质吸力概念,被认为是一种广义的吸力。

尽管非饱和土的强度理论表述形式存在以上的差异,但一个普遍的共识是:由非饱和土内水-气两相的界面作用产生吸力(或引起的水气界面膜第四相),而因吸力产生附加吸力强度,无论这种吸力是渗透吸力、溶质吸力或基质吸力。

计算吸力产生的附加剪切强度就需要测量吸力值,由于目前实验条件下精确测量吸力数值存在困难,对于非饱和和膨胀土,卢肇均等(1997)先后根据试验结果将膨胀土膨胀力与吸力强